第 39 卷　第 2 期　　天　文　学　进　展　　Vol. 39,　No. 2
2021 年 6 月　　PROGRESS IN ASTRONOMY　　June., 2021

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2021.02.06

红外尘泡 N109 中的恒星形成

孙金旭[1,2]，李金增[1]，刘洪礼[3,4]，董晓怡[1]，袁敬华[1]，张国印[1]

(1. 中国科学院 国家天文台 中阿观测基地，北京 100012；2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 云南大学 天文系，昆明 650091；4. Departamento de Astronomía, Universidad de Concepción, Av. Esteban Iturra s/n, Distrito Universitario, 160-C, Chile)

摘要： 与电离氢区成协的红外尘泡是研究恒星形成尤其是触发恒星形成的理想天体实验室。利用多波段数据对银河系中最大的尘泡之一 N109 进行了研究，分析了它对其近邻介质及其中恒星形成活动的影响。研究发现 N109 周围存在 56 个致密团块，主要分布在正北部和西部。它们均可能形成恒星，其中 5 个很可能形成大质量恒星，而其他的均可能形成小质量恒星。在这两个区域还存在 5 个袖珍电离氢区，意味着新一代的大质量恒星形成。此外，还观测到与 N109 成协的电离氢区的膨胀正在挤压正北和西部星际介质的迹象。这些结果共同表明红外尘泡 N109 正在通过电离氢区膨胀作用于周围介质，并通过挤压的方式再聚集物质，为新一代恒星形成提供了场所，这可能为触发恒星形成提供了一个必要的条件。

关　键　词： 大质量恒星形成；星际介质；电离氢区；分子云；红外尘泡

中图分类号： P155.2　　　**文献标识码：** A

1　引　言

大质量恒星 ($M_\star \geqslant 8\,M_\odot$) 通常以成团的形式诞生于致密的分子云中。在其形成和演化的早期阶段，大质量恒星在其母分子云中会产生一些剧烈的反馈，如外向流、星风、膨胀的电离氢区以及超新星爆炸。一方面，这些反馈迫使其周围的致密分子云加速到逃逸速度，将其耗散成为弥散气体，从而抑制新一代恒星形成；另一方面，这些反馈会压缩周围的星际介质，使其再次形成引力不稳定的分子云，进而触发新一代的恒星形成，这一过程就是所谓的触发恒星形成。

无论是在理论还是观测上，人们在过去几十年开展了很多关于触发恒星形成尤其是与电离氢区关联的研究[1−14]。在理论上，有两种主要的模型至今仍被广泛讨论，即聚集坍缩[1] (collect and collapse) 和辐射驱动内暴[2, 3] (radiation-driven implosion)。简而言之，聚集

收稿日期： 2020-09-10；　**修回日期：** 2020-12-11

资助项目： 科技部国际合作“走出去”重大专项 (2010DFA02710)；国家自然科学基金 (11503035, 11573036)

通讯作者： 刘洪礼，hlliu0104@ynu.edu.cn

坍缩模型描述的是一个电离氢区周围的物质在电离波前 (ionization front) 和激波波前 (shock front) 被重新聚集并形成具有壳层 (或环状) 结构的分子云，最后由于引力不稳定性坍缩形成新一代恒星的过程。这一模型可以较好地解释所观测到的一些位于形态规则的电离氢区周围的恒星形成活动，如 Sh 104[15], RCW 79[16], RCW 120[6] 和 N4[17]。辐射内暴模型是指一个由电离波前所驱动的激波波前去触发一个原本存在并处于亚临界条件的分子云团块使其内暴，从而坍缩形成新一代恒星的过程。相比于聚集坍缩，辐射内暴模型少了一个物质再聚集的过程。在观测上，人们在一些亮边云 (bright rim cloud) 恒星形成活动中也寻找到了一些关于辐射内暴过程的可能迹象[18, 19]。

在观测上，电离氢区已经被证实遍布于整个银河系。得益于斯皮策 (Spitzer) 中红外太空望远镜的两个巡天观测项目 GLIMPSE 和 MIPSGAL[20, 21]，一类新的天体被发现广泛地存在于银河系中，即红外尘泡。它的主要观测特征为在中红外波段的尘埃连续谱图像中呈现出一个很亮的环状结构。利用该特征，Churchwell 等人[22]证认并首次编录了一个约 600 个尘泡的源表。基于同样的巡天资料，一个包含约 5 000 多个红外尘泡的更大样本源表由网上招募的公众天文学家证认并由 Simpson 等人[23]编录完成。事实上，Deharveng 等人[24]利用可以示踪电离氢区的 MAGPIS[25] (The Multi-Array Galactic Plane Imaging Survey) 的 20 cm 数据对 102 个选定的红外尘泡进行了详细研究，发现约有 86% 的红外尘泡与由 OB 型星驱动的电离氢区成协。这说明红外尘泡与电离氢区之间有紧密的联系。

在统计上，银河系中电离氢区膨胀所导致的触发恒星形成是一个重要的物理过程，尤其是大质量恒星形成。例如，Thompson 等人[26] 通过寻找大质量年轻星天体 (massive young stellar objects, MYSOs) 与 Churchwell 源表中的 322 个红外尘泡的成协性，发现银河系中约有 14%~30% 的大质量恒星形成可能受到了电离氢区或者是红外尘泡膨胀的触发。随后，Kendrew 等人[10]采用类似的方法并利用一个更大样本 (即 Simpson 源表中的 1 018 个红外尘泡) 发现约有 22%±2% 的 MYSOs 的形成可能与触发恒星形成相关。这些统计结果一致表明，银河系中约有 14%~30% MYSOs 的形成可能经历了触发恒星形成过程。

从红外尘泡的大样本研究中，我们意识到触发恒星形成可能是银河系中一种重要的恒星形成机制。更进一步，对红外尘泡的单个样本进行独立、细致的研究，在揭示电离氢区如何与其近邻介质相互作用以及触发恒星形成过程方面也至关重要。已有研究通常局限于物理尺度较小的红外尘泡，尺度小于 20 pc，例如，红外尘泡 S51[27] (1.47 pc), N4[17] (1.9 pc), N6[28] (11 pc), N131[29] (14 pc) 和 N68[30] (25.5 pc)。然而，更大尺度的红外尘泡具有更长的演化时标，这有助于我们研究尘泡如何影响星际介质演化及新一代恒星形成活动[31]。为此，本文对 Churchwell 源表中最大的尘泡之一 N109 进行了系统的多波段研究。N109 位于银经 51.892° 和银纬 0.562°。它实际上与一个大尺度的电离氢区 G52L 成协[32]。设尘泡的视向速度为 $v_{\rm LSR}$=4.2 km · s^{-1} (见第 3 章)，利用在线的运动学距离计算工具①，我们算出 N109 距离太阳约为 (9.63±0.38) kpc。N109 的等效几何角半径为 14.8″，对应的物理尺度为 41.5 pc。本文旨在利用多波段数据来研究 N109 对周围介质的作用以及恒星形成活动。在第 2 章中，

①http://bessel.vlbi-astrometry.org/node/378

介绍了研究使用的数据来源；在第 3 章中，详细描述了致密团块和 YSOs 的证认过程；第 4 章，对致密团块的性质和恒星形成活动进行了讨论；第 5 章对全文进行了总结。

2　观测数据

为了利用多波段的物理信息来系统地研究 N109，本文使用 Spitzer-GLIMPSE 和 MIPSGAL 中红外、Herschel Hi-GAL[33] 远红外图像数据、GRS[34] ^{13}CO(J=1−0) 毫米波分子谱线以及 VGPS[35] 21 cm 波连续谱巡天数据，下面进行详细介绍。

GLIMPSE 是利用 Spitzer 空间望远镜上的 IRAC (inrared array camera) 设备在 3.6, 4.5, 5.8 和 8.0 μm 四个波段对整个银道面开展的巡天项目。MIPSGAL 则是利用同一台望远镜上面的 MIPS (multiband infrared photometer for Spitzer) 设备在 24 μm 和 70 μm 波段上所开展的内银道面巡天项目 (银经 $|l| \leqslant 65°$，银纬 $|b| \leqslant 1°$)。GLIMPSE 四个波段的数据具有相同的角分辨率，约为 2″；MIPSGAL 两个波段数据的角分辨率分别为 6″ 和 18″。

GRS 是由美国五大学射电天文台的 13.7 m 毫米波望远镜开展的分子谱线 ^{13}CO(J=1−0) 的银河环巡天项目。巡天范围涵盖 $18° \leqslant l \leqslant 55.7°$，$|b| \leqslant 1°$，观测总面积达到了 75.4 平方度。在 $l \leqslant 40°$，^{13}CO(J=1−0) 的速度分布范围为 $-5 \sim 135$ km · s^{-1}，其他天区内的速度分布范围为 $-5 \sim 85$ km · s^{-1}。整个巡天数据的速度分辨率为 0.21 km · s^{-1}，每一个速度通道上的典型噪声为 0.13 K。

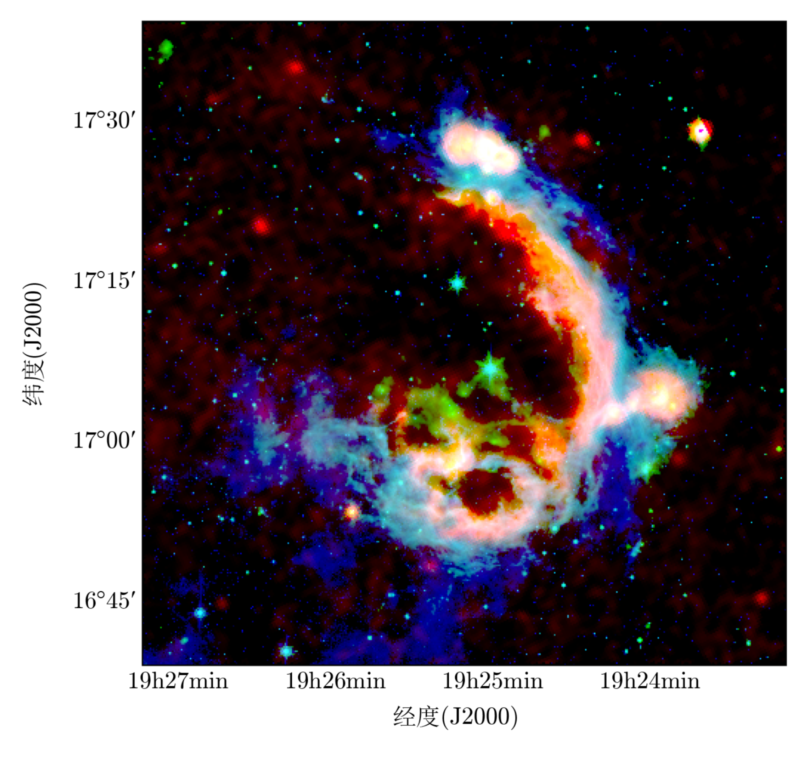
Hi-GAL 是一个由 Herschel 空间望远镜在 5 个远红外波段对整个银道面成图的巡天项目。该项目由工作波长为 70 和 160 μm 的 PACS[36] (photodetector array camera spectrometer) 与波长为 250, 350 和 500 μm 的 SPIRE[37] (spectral and photometric imaging receiver) 设备以平行测光模式同步扫描观测，扫描速度为 60″ · s^{-1}[38]。5 个波长上的最终测量角分辨率分别为 8.4″, 13.5″, 18.2″, 24.9″ 和 36.3″[39]。它们在 N109 上对应的实际分辨大小为 0.4, 0.6, 0.8, 1.2 和 1.7 pc。本文既使用了 Hi-GAL 的图像资料又使用了其源表。Hi-GAL 团队利用 CuTEx 算法分别在 5 个波段的图像中进行致密源认证，并制成相应的源表。该算法可以在复杂的银道面红外背景下优化致密源的证认。源表中包含源的位置、峰值流量、积分流量以及尺度等信息[40]。

VGPS 是致力于 HI 谱线和 21 cm 连续谱的 VLA 观测巡天，区域为 $18° \leqslant l \leqslant 67°$，银经的范围为 $|b| \leqslant 1.3°$，角分辨率约为 1′。在本工作中，我们只利用 21 cm 连续谱数据来揭示电离氢区与周围介质之间的相互作用。

3　结果分析

N109 的三色合成图由图 1 所示，红绿蓝三颜色分别代表 21 cm, 24 μm 和 8 μm 连续谱辐射。21 cm 连续谱辐射主要源于电离气体。8 μm 发射主要来自 7.7 和 8.6 μm 处的多环芳香烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 的辐射，意味着光致离解区的出现

(photodissociation regions, PDRs)。如图 1 所示，8 μm 发射紧密环绕着 21 cm 辐射并且形成一个很好的环状结构，这说明电离氢区所产生的电离气体正在强烈作用于周围的星际介质。此外，24 μm 辐射既分布在电离氢区的中心也出现在环状结构上 (即红外尘泡边缘)。该分布与 24 μm 辐射的起源紧密相关，24 μm 辐射被认为是来自很热的尘埃，它可以吸收由电离星 (即电离氢区的激发星) 产生的高能紫外光子而具有相当高的温度。另一种可能是它被大质量年轻星所产生的辐射加热到很高温度，这类辐射通常呈现出局部很亮的特征。在 N109 的最北部，恰好可以看见两个 24 μm 辐射局部很亮的泡状结构，意味着这里甚至整个红外尘泡已经存在新一代的恒星形成活动。

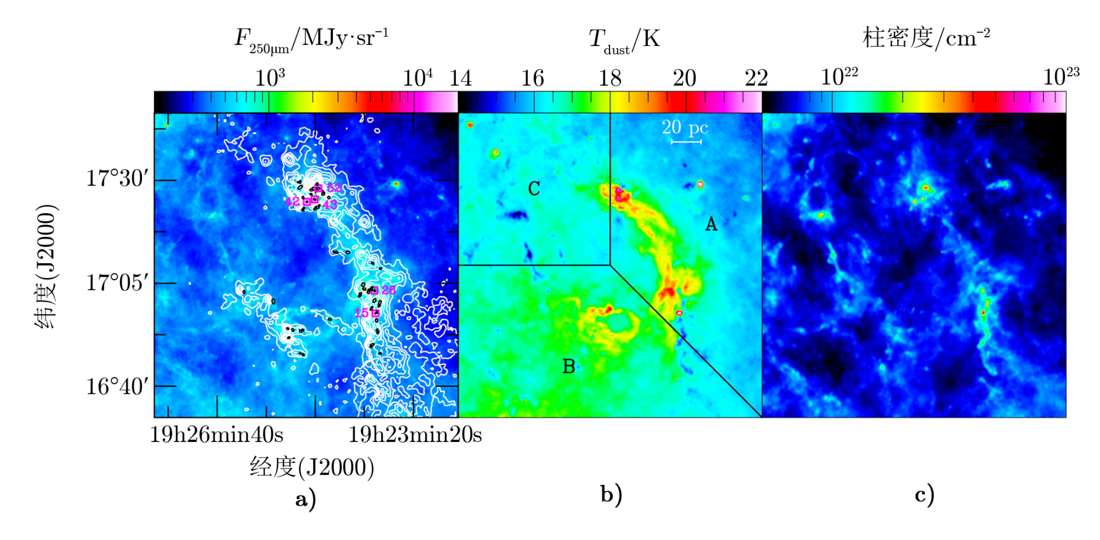


注：红、绿和蓝色分别代表 VGPS 21 cm, MIPSGAL 24 μm 和 GLIMPSE 8 μm。

图 1 红外尘泡 N109 概貌

图 2a) 给出了 N109 在 250 μm (彩色背景) 的尘埃辐射和 ^{13}CO(J=1−0) 分子谱线辐射 (等值线) 概貌。^{13}CO 的积分强度图的速度积分范围为 $-2.5 \sim 10.0\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$，对应的线心速度为 $4.2\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$。可以看出，该速度成分上的 CO 发射与 250 μm 冷尘埃辐射一致，均分布在红外尘泡的边缘；这预示着红外尘泡周围的介质很可能在电离氢区膨胀挤压作用的推动下正在重新聚集 (见第 4 章)。另外，尤其是从 CO 辐射中可以看出一些凸显的小尺度的分子云团块，它们有可能是下一代恒星形成的摇篮。通过对 CO 的速度通道图的仔细观察 (如图 2b) 中的 A)，发现在大尺度上存在两个速度成分，它们的速度从北 (红移成分如 $6.16 \sim 7.84\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$) 至南 (蓝移成分如 $-1.8 \sim 1.12\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$) 具有一个连续性速度梯度，并

且对应速度的气体看起来正趋向于 N109 的主壳层结构；这说明两个速度成分的气体跟尘泡之间具有紧密的物理联系。我们猜测，与尘泡成协的电离氢区由于膨胀运动导致原本一个速度成分的壳层结构分离成了两个速度成分；又或者电离氢区原本就形成于两个不同速度成分丝状结构的连接处，即使电离氢区形成后，两个不同速度的丝状结构依然存在。这两种猜测还需要后续更加详实的动力学分析来验证，我们不在本文多加讨论。



注：a) 背景为 250 μm 尘埃发射，等值线为 CO 强度积分图。等值线始于 3σ (1σ=0.3 K · km · s^{-1})，步长为 3σ，椭圆为致密团块。4 个大质量团块 (15, 26, 42, 43) 以及与 II 型甲醇脉泽成协 (15, 43, 52) 的团块用方框标出。b) 温度分布图中的 3 个区域用 A, B, C 标出，用于分析尘泡的径向流量分布。

图 2　a) 致密团块空间分布图；b) 尘埃温度分布图；c) 柱密度分布图

3.1　致密团块的证认和参数获取

致密分子云团块为恒星形成提供了物质输送并决定恒星的最终质量。为了研究 N109 中致密团块的物理性质 (如质量、密度、尺度等)，我们接下来将证认出所有可能形成恒星的致密团块。我们从 Hi-GAL 250 μm 的公开源表获取致密团块的位置、大小和流量等信息。

为了获得可靠的致密团块，进行了严格的数据筛选。首先，每个团块的长轴与短轴之比小于 3，这有助于筛选掉细长的结构，如纤维状或者弥散的大尺度分子云结构。其次，只挑选那些信噪比 (即峰值与局部背景水平的比值) 大于 3 的源。除此之外，^{13}CO(J=1−0) 在速度 −2.5 ∼ 10.0 km · s^{-1} 内的积分强度图被用来进一步限制与 N109 成协的致密团块；要求致密团块的 CO 分子发射强度至少大于 5σ，1σ=0.33 K · km · s^{-1}，这样有助于尽可能排除来自背景的污染源。我们初步挑选出 199 个致密团块侯选体。

为了获取每个团块的尘埃温度，通过对 N109 整个区域做逐像素能谱分布 (spectral energy distribution, SED)，拟合得到了尘埃温度和柱密度分布图 (见图 2b), c))。具体的拟合公式为一个修正的灰体谱，表示如下：

$$I_v = \kappa_{v_0} (v/v_0)^{\beta} B(T_d) \mu m_{\rm H} N({\rm H_2}) \quad , \tag{1}$$

式中，I_v 是辐射面亮度，$B(T_d)$ 是温度为 T_d 时的黑体辐射亮度，平均分子权重 μ 被假定为 2.8[41, 42]，$m_{\rm H}$ 是氢原子质量。单位质量的气体和尘埃不透明度定义为：$\kappa_{v_0}(v/v_0)^{\beta}$，在 v_0=1 THZ，气尘质量比为 100 的前提下，$\kappa_{v_0}=0.1\,{\rm cm}^2\cdot{\rm g}^{-1}$[43]。除此之外，据 HII 区的大样本统计结果，尘埃辐射系数 β 为 2[44]。除了 70 μm，Herschel 其他四个波段参与了 SED 拟合[13, 45]。70 μm 的尘埃辐射可能还示踪更热的成分，如很小的热尘埃颗粒和由原恒星加热的物质，因此无法被单一温度的灰体谱很好地拟合。在拟合之前，这四个波段的图像首先被平滑到同一分辨率 (为 36″)，然后被栅格化成同一像素大小 (为 11.5″)。值得注意的是，由于很难估计在沿着 N109 视线方向上背景污染辐射对该区域的实际贡献，在拟合之前没有对各个波段的辐射面亮度进行背景扣除。其实背景污染对 N109 区域的尘埃温度的影响要远小于柱密度，后者高度依赖于面亮度的变化 (见公式 (1))。图 2 给出了由逐像素 SED 拟合得到的柱密度和温度分布图。我们可以看到温度分布图很好地展示了 N109 的大尺度壳状结构，壳层上的温度明显高于其周围介质温度。同样，从柱密度的分布上也能看到 N109 壳层结构，但不像温度分布图呈现的那么明显。尤其是，位于正南方位的小尘泡在温度分布上有明显的环状结构，而在柱密度上的结构就模糊不清，这定性地说明了背景污染对柱密度的影响远大于温度。

理论上可以从柱密度图上来证认 N109 中的致密团块，但实际上却很困难。一方面，由于 N109 的距离太远导致视线方向上的背景污染很严重，并且各个波段受到的影响也不尽相同，所以一些致密团块很难在柱密度图中显现出来，见图 2a)。另一方面，得到的柱密度图分辨率 36.3″ (约 1.7 pc)，相对于致密团块的典型尺度 (约 0.1~1 pc)，这在 N109 上是一个较大的尺度，因此不利于证认出致密的小尺度团块结构。鉴于这两个因素，以及 250 μm 既能示踪致密的冷尘埃物质又具有较高分辨率 (约 0.8 pc)，我们直接采用了 Hi-GAL 在 250 μm 的公开源表来获取致密团块的观测参量。同时，我们从尘埃温度图中提取了致密团块的平均温度。给定致密团块的温度，以及在 250 μm 处的流量，团块的质量即可通过下式获得：

$$F_v=\frac{\kappa_v B_v(T_d)\,M_{\rm clump}}{D^2}\quad, \tag{2}$$

其中，F_v 是团块在频率为 ν 处流量，D 是尘泡距离，$M_{\rm clump}$ 是致密团块质量。如果将团块简单地近似成一个球体，我们即可得到它的数密度 $n({\rm H_2})$：

$$n({\rm H_2})=\frac{M_{\rm clump}}{4/3\pi R^3\mu m_{\rm H}}\quad, \tag{3}$$

这里，R 即为团块等效半径。相应地，团块的柱密度可以近似为 $n({\rm H_2})=N({\rm H_2})/2R$。

通过对天鹰座 (Aquila) 分子云复合体的观测研究，André 等人[46]发现星前核的柱密度阈值为 $N({\rm H_2})>7\times10^{21}\ {\rm cm}^{-2}$。星前核即为一个引力束缚且具备恒星形成条件的无星云核。在本工作中，我们主要研究电离氢区对近邻介质中恒星形成的影响。因此，我们只考虑那些最终可能形成恒星的致密团块，也就是团块的柱密度至少为 $7\times10^{21}\ {\rm cm}^{-2}$。利用这一条件进行筛选，最终得到了 56 个可能具备形成恒星的致密团块。它们相关的参数已在表 1 中列出，依次为源的编号、J2000 坐标、长轴长度、短轴长度、波束去卷积后的等效半径、250 μm 流量、温度、柱密度、质量。

表 1 致密团块参数表

No.	经度 /h:min:s	纬度 /h:min:s	$FWHM_{\rm maj}$ /(″)	$FWHM_{\rm min}$ /(″)	$R_{\rm eff}$ /pc	$F_{250\mu\rm m}$ /Jy	$T_{\rm dust}$ /K	$N(\rm H_2)$ /10^{21} cm^{-2}	$n(\rm H_2)$ /10^3 cm^{-3}	M /$M_\odot$
1	19:25:12.3	16:47:39	30.4	28.8	0.5	5.6	17.0	9.1	2.7	127
2	19:25:15.4	16:47:57	25.4	22.1	0.4	4.1	16.6	16.2	7.3	98
3	19:23:54.0	16:47:59	33.9	23.4	0.5	3.2	15.6	8.0	2.6	96
4	19:24:03.3	16:49:35	31.0	27.1	0.5	12.0	16.6	22.2	6.8	292
5	19:24:02.0	16:50:04	61.0	27.3	0.9	18.5	16.8	12.5	2.4	428
6	19:25:27.0	16:51:46	21.5	37.3	0.5	12.4	17.1	22.3	7.1	274
7	19:23:56.2	16:53:06	47.7	23.6	0.7	6.9	15.6	10.3	2.5	211
8	19:25:14.8	16:53:22	43.0	30.2	0.7	16.9	18.6	11.2	2.5	278
9	19:23:56.9	16:53:35	43.2	22.7	0.6	7.1	15.7	12.6	3.4	211
10	19:25:22.8	16:53:39	47.0	28.3	0.7	10.2	18.1	7.1	1.5	182
11	19:25:12.7	16:53:40	23.1	28.4	0.4	3.9	18.2	8.2	3.1	69
12	19:25:28.0	16:54:00	25.1	36.0	0.6	5.8	18.1	7.1	2.0	105
13	19:23:57.6	16:55:59	51.5	31.8	0.8	9.3	15.9	7.8	1.5	263
14	19:24:45.1	16:56:15	48.8	27.7	0.7	11.9	18.5	7.7	1.7	200
15	19:23:58.7	16:57:42	22.9	19.7	0.3	289.9	21.2	1 093.5	673.1	3 558
16	19:23:57.2	16:58:00	32.4	17.0	0.4	12.9	18.6	36.9	17.0	212
17	19:24:02.8	16:58:54	62.4	24.6	0.8	10.0	17.0	7.2	1.4	222
18	19:23:54.9	16:59:35	51.5	22.6	0.7	16.4	16.2	20.5	4.9	439
19	19:23:54.2	17:00:21	58.7	32.3	0.9	17.9	16.0	12.4	2.2	497
20	19:25:42.6	17:00:38	77.5	40.4	1.2	30.0	18.0	7.7	1.0	554
21	19:23:59.8	17:00:48	61.7	36.0	1.0	19.6	17.7	7.8	1.2	378
22	19:24:14.8	17:01:56	41.5	19.2	0.5	8.4	19.4	10.0	3.2	121
23	19:24:14.0	17:02:30	26.1	36.0	0.6	9.3	19.6	8.3	2.3	131
24	19:24:05.9	17:02:49	31.0	36.0	0.7	18.1	19.9	12.0	3.0	242
25	19:26:12.5	17:02:53	4.91	27.3	0.7	7.2	16.2	9.0	2.2	190
26	19:23:59.7	17:03:12	29.4	22.9	0.4	19.8	16.8	52.8	19.7	469
27	19:24:05.2	17:03:21	23.5	36.0	0.5	10.0	19.6	10.6	3.2	141
28	19:24:02.8	17:03:27	18.7	36.0	0.4	6.2	18.6	11.5	4.3	102
29	19:24:10.1	17:03:37	46.7	33.9	0.8	27.9	19.4	12.5	2.4	401
30	19:24:02.3	17:03:57	22.0	37.9	0.5	6.2	18.7	7.7	2.4	99
31	19:24:11.1	17:04:41	57.6	41.1	1.1	25.8	18.8	7.8	1.2	408
32	19:23:53.5	17:08:35	32.3	27.5	0.6	6.1	16.9	9.7	2.8	140
33	19:24:01.4	17:09:53	38.5	27.3	0.6	6.0	16.5	8.0	2.1	149
34	19:24:26.8	17:12:31	53.6	36.3	1.0	17.8	18.0	7.9	1.4	328
35	19:24:38.0	17:12:32	43.6	23.7	0.6	9.0	17.7	9.7	2.5	175
36	19:24:40.6	17:12:33	22.3	40.6	0.6	8.7	17.1	12.9	3.7	192
37	19:25:12.7	17:22:48	25.1	31.6	0.5	12.4	17.9	19.4	6.2	234
38	19:25:00.1	17:23:06	47.1	27.5	0.7	18.8	19.7	10.3	2.3	257
39	19:25:11.8	17:23:15	19.0	36.0	0.4	7.7	17.5	17.1	6.3	157

(续表)

No.	经度 /h:min:s	纬度 /h:min:s	$FWHM_{\rm maj}$ /(″)	$FWHM_{\rm min}$ /(″)	$R_{\rm eff}$ /pc	$F_{250\mu{\rm m}}$ /Jy	$T_{\rm dust}$ /K	$N({\rm H_2})$ /$10^{21}\,{\rm cm}^{-2}$	$n({\rm H_2})$ /$10^{3}\,{\rm cm}^{-3}$	M /$M_\odot$
40	19:24:58.1	17:23:28	64.8	30.7	1.0	27.1	19.8	8.6	1.5	368
41	19:24:55.8	17:23:56	25.3	19.4	0.3	5.1	17.9	22.7	12.3	96
42	19:25:08.5	17:24:47	23.4	20.9	0.3	78.2	18.3	335.3	180.7	1 424
43	19:25:00.5	17:25:23	33.8	22.9	0.5	112.3	21.3	108.3	35.4	1 247
44	19:25:12.5	17:25:50	24.4	36.0	0.6	9.2	18.5	11.0	3.2	155
45	19:24:46.1	17:25:50	32.4	36.4	0.7	13.2	16.8	14.0	3.3	306
46	19:25:04.3	17:26:39	30.3	21.1	0.4	5.8	19.9	9.6	3.7	77
47	19:24:51.8	17:26:47	52.7	36.0	0.9	40.6	19.3	14.9	2.6	599
48	19:24:52.4	17:27:16	46.7	26.2	0.7	29.3	18.4	21.8	5.0	501
49	19:24:59.0	17:27:27	49.5	17.4	0.5	16.4	22.0	11.9	3.6	162
50	19:25:03.8	17:27:41	47.9	27.0	0.7	18.5	20.3	9.4	2.1	231
51	19:25:01.0	17:27:56	67.9	34.0	1.0	88.4	21.9	17.6	2.7	892
52	19:24:56.9	17:28:06	46.4	28.8	0.7	21.0	16.7	19.6	4.3	506
53	19:25:15.4	17:28:20	79.5	36.0	1.2	30.5	18.7	7.6	1.0	494
54	19:24:58.1	17:29:09	26.2	35.3	0.6	12.4	16.0	22.4	6.3	344
55	19:25:17.2	17:29:33	19.6	30.8	0.4	3.4	16.7	11.3	4.7	80
56	19:25:15.4	17:29:39	40.1	23.3	0.6	7.7	16.9	11.2	3.1	175

3.2 红外尘泡的动力学年龄

给定电离氢区的典型电子温度 $T_e \approx 10^4\,{\rm K}$，热声速 $C_s \approx 10\,{\rm km{\cdot}s^{-1}}$，周围介质的初始密度 $n_0 \approx 10^3\,{\rm cm^{-2}}$，半径 $R = 41.5\,{\rm pc}$，我们可以利用经典的电离氢区演化模型来推算其动力学年龄及激发星的性质[13, 17, 29, 47, 48]。例如，将我们测得的包含在电离氢区内部的 21 cm 辐射流量 $S_v = 11.5\,{\rm Jy}$ 代入公式[29, 48]：

$$N_{\rm LyC} \approx 4.761 \times 10^{48} v^{0.1} T_{\rm e}{}^{-0.45} S_v D^2 \quad , \tag{4}$$

其中，v 是 21 cm 对应的频率，D 为尘泡的距离。利用公式 (4) 得到激发星每秒所激发的莱曼光子数为 $N_{\rm Lyc} = 5 \times 10^{49}\,{\rm s^{-1}}$，其对应为 O3V 型星[49]。另外，电离氢区的动力学年龄表示为：

$$t_{\rm dyn} = \frac{4R_s}{7C_s}\left[\left(\frac{R}{R_s}\right)^{\frac{7}{4}} - 1\right] \quad , \tag{5}$$

其中，$R_s = (3N_{\rm Lyc}/4\pi n_0^2 \alpha_B)^{1/3}$ 为斯特龙根球半径，$\alpha_B = 2.6 \times 10^{-13}\,(10^4{\rm K}/T_e)^{0.7}\,{\rm cm^3 \cdot s^{-1}}$ 是氢离子的电子-离子复合速率系数[50]。利用公式 (5) 可以估算出 $t_{\rm dyn} \approx 40\,{\rm Ma}$。这一结果让我们感到很惊讶，因为一般对于具有 O 型光谱的大质量星来说，它们处在主序阶段的时标不超过 5~6 Ma[51, 52]。因此，由式 (5) 计算的动力学年龄肯定被严重高估了。高估的原因可能有两种：(1) 计算出的 N109 的距离不准确；(2) 是经典的动力学演化模型已经不适用于像

N109 这样的超大电离氢区。关于距离，我们目前采用的是由贝塞尔计划团组开发的距离计算器所提供的运动学距离，并且有且仅有一个计算结果，即为 9.6 kpc；因此，N109 的距离不存在远近的模糊性。经典模型在解释超大电离氢区的演化上具有的局限性，由 Tremblin 等人[53]发现，激发星质量越大 (如 $N_{\rm Lyc} > 10^{49}\ {\rm s^{-1}}$)，电离氢区的动力学年龄分布就变得很随机，不像其他更小质量激发星驱动的电离氢区那样具有特征分布；这说明，像 N109 这样由一个光谱型为 O3V 的激发星所驱动的电离氢区，它的演化很可能没法用现有的动力学模型来很好地描述。另外，现有的理论模型均假设电离氢区的整个演化过程都处在均匀的介质内[47, 53]，但该假设与观测到的 N109 周围的不均匀介质环境不相符。比如，由 CO 发射可以看出 N109 周围的介质当前主要分布在位于西北方向的壳层结构上，在其他方位的介质却很稀薄。综上所述，我们粗略地认为红外尘泡的动力学年龄与电离氢区的激发星的主序阶段年龄相近，约几百万年，但不超过 5~6 Ma。

3.3　YSOs 的分类

YSO 包括了原恒星和主序前星。原恒星伴有星周盘，它可以吸收原恒星的光子并再产生很亮的红外辐射。随着星周盘上物质的耗散，红外波段的辐射会迅速减弱。利用 YSO 在红外 2.2 ~ 10 μm 波段的能谱 (发射) 特征，Lada[54]与 Greene 等人[55]定义了一个能谱指数 α ($\alpha = \dfrac{{\rm d\,lg}(\lambda F_\lambda)}{{\rm d\,lg}(\lambda)}$，$F_\lambda$ 为对应波长 λ 上的流量)，并据此将 YSOs 分为三类：Class I, Class II 和 Class III。Class I 是深度嵌埋并带有星周盘的原恒星；Class II 具有一个红外亮的吸积盘，它也被称为金牛座 T 型星或者猎户座 Fu 星天体；Class III 为经典的主序前星，其周围的包层几乎都被驱散。谱指数分类方法本质上与年轻星的 SED 分类方法[56, 57]类似，如果它们的距离已知，后者可以更加准确地限定 YSO 的类别。以谱指数或者 SED 分类为基础，人们后来又探索出一套快速有效的 YSO 证认和分类工具，也就是双色图 (color-color diagram)。如 Gutermuth 等人就提出了一套实用的、针对 Spitzer 中红外数据快速证认和分类 YSO 的颜色判据，并且还发现了一类处于 Class II 与 Class III 中间的过渡阶段，即过渡盘 (transition disk, TD) 天体[58, 59]。前两种 YSO 证认和分类方法较双色图更加准确，但是需要一个大动态范围、多波段测光流量信息，如从近红外至远红外甚至毫米波。鉴于 N109 所处距离远，很难获取与之成协的 YSO 的近红外测光流量，如受巡天本身的灵敏度限制，我们只利用中红外数据并采用第三种快速的双色图方法来证认和分类与 N109 成协的 YSOs。

为了证认与 N109 成协的 YSO 侯选体，我们首先从 GLIMPSE Spring’07 archive 点源表①中提取出了集中在红外尘泡中心 (RA = 219.290°, Dec = 17.154°) 0.45 度半径范围的 94 566 个点源测光数据。为了保证数据质量，我们要求各个波段 (3.6, 4.5, 8.0 和 24 μm) 的测光流量误差小于 0.2 mag。然后我们利用 Gutermuth 等人[59]给出的 YSO 红外颜色判据：

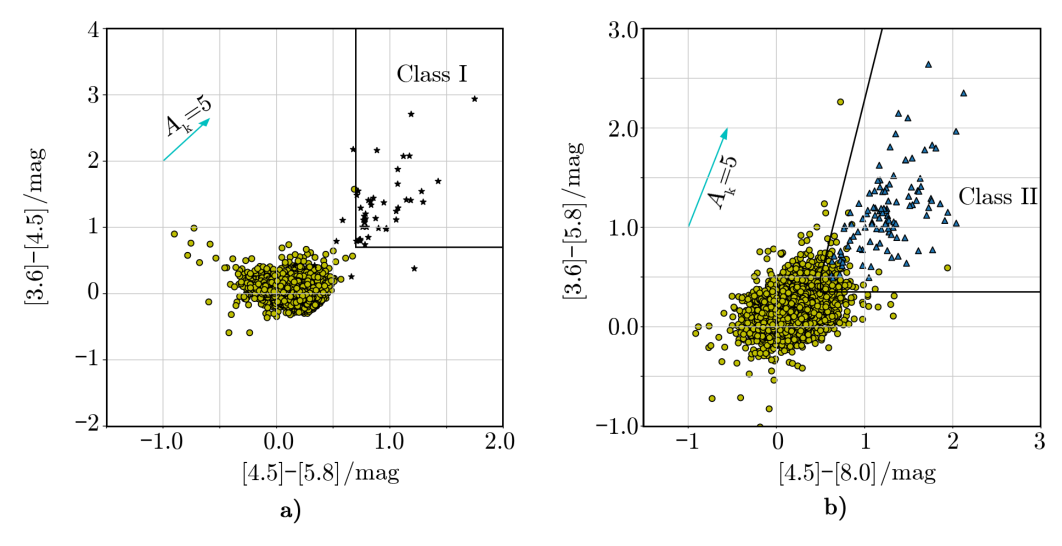
(1) Class I，$[4.5]-[5.8]>0.7$ 和 $[3.6]-[4.5]>0.7$；

(2) Class II，$[4.5]-[8.0]-\sigma_{24}>0.5$ 和 $[3.6]-[5.8]-\sigma_{13}>0.35$, $[3.6]-[5.8]+\sigma_{13}\geqslant\dfrac{0.14}{0.04}[([4.5]-[8.0]-\sigma_{24})-0.5]+0.5$, $[3.6]-[4.5]-\sigma_{12}>0.35$；

(3) TDs，$[24]<7$, $[5.8]-[24]>2.5$ 或 $[4.5]-[24]>2.5$, $[3.6]<14$。

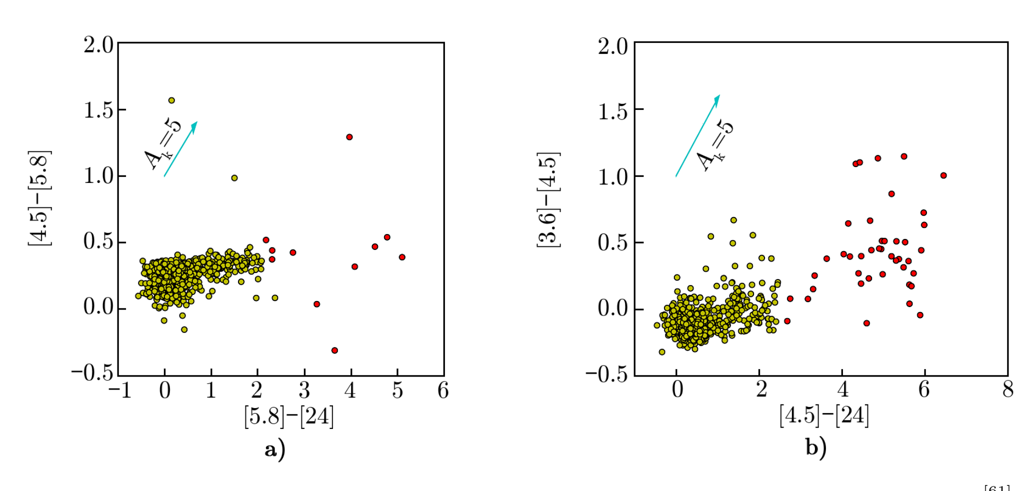
①https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/Gator/

这里，[3.6], [4.5], [5.8], [24] 分别代表相应波段的流量，σ_{12}, σ_{13}, σ_{24} 代表 [3.6] 和 [4.5]，[3.6] 和 [5.8]，[4.5] 和 [24] 波段的测光不确定度。利用上述判据，我们一共获得 61 颗 Class I，110 颗 Class II，47 颗 TD 侯选体。图 3 和图 4 为证认结果。值得一提的是由该方法筛选出来的年轻星侯选体有可能包含沿着 N109 视线方向的污染源，但统计上这不会严重影响下面的进一步分析[13, 60]。



注：黑色星形、蓝色三角和黄色圆点分别代表 Class I、Class II 和场星。矢量箭头代表值为 5 mag 的消光矢量，由 Koenig 和 Leisawitz[61] 与 Flaherty 等人[62] 消光规律求得。

图 3　a) Spitzer IRAC 的 I1、I2 和 I3 波段的双色图；b) IRAC 的 I1、I2、I3 以及 I4 波段的双色图

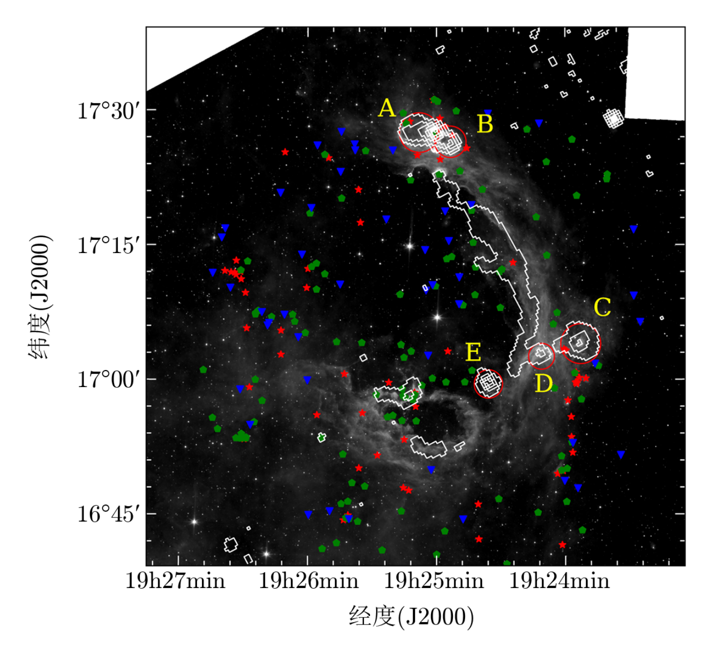


注：红色和黄色圆点分别代表 TD 和场星。矢量箭头代表值为 5 mag 的消光矢量，由 Koenig 和 Leisawitz[61] 与 Flaherty 等人[62] 消光规律求得。

图 4　a) Spitzer IRAC 的 I2 和 I3 以及 MIPS 24 μm 波段的双色图；b) IRAC 的 I1 和 I2 以及 MIPS 24 μm 波段的双色图

4 讨论

图 2a) 展示致密团块的空间分布。由图可知，致密团块主要分布在 N109 壳层结构的北部和西部。这些团块的平均柱密度为 $1.38\times10^{22}\,\mathrm{cm}^{-2}$，具备形成恒星的密度条件。也就是说，如果这些致密团块未来可以形成恒星，N109 壳层结构中的恒星形成活动主要集中在北部和西部。这一结果事实上也与新一代正在形成的大质量恒星形成活动区吻合。由 21 cm 连续谱发射可以看出，在 N109 北部和西部有 5 个袖珍的连续谱发射团块 (如图 5)，即北部 2 个 (A 和 B) 和西部 3 个 (C—E)。这些 21 cm 致密发射团块揭示了电离氢区的存在，其尺度 (约为 5 pc) 表明它们属于经典的小尺度电离氢区而不是致密电离氢区[63] (直径 <0.5 pc)。为此，我们接下来称这些 21 cm 致密发射团块为袖珍电离氢区。一方面，由于它们仍嵌埋在分子云团内部，说明还处在演化的极早期，时标肯定比 N109 的小；另一方面，利用 Tremblin 等人[53] 给出的电离氢区尺度大小与年龄的关系进行简单比较，可以得出袖珍电离氢区的时标比 N109 的小，因此我们认为它们是 N109 近邻的新一代大质量恒星形成活动的表征。此外，Kauffmann 和 Pillai[64] 提出的分子云核或团块的质量-尺度关系常被用来预测它们未来是形成小还是大质量恒星，即 $m(r)\geqslant 870M_\odot(r/\mathrm{pc})^{1.33}$。

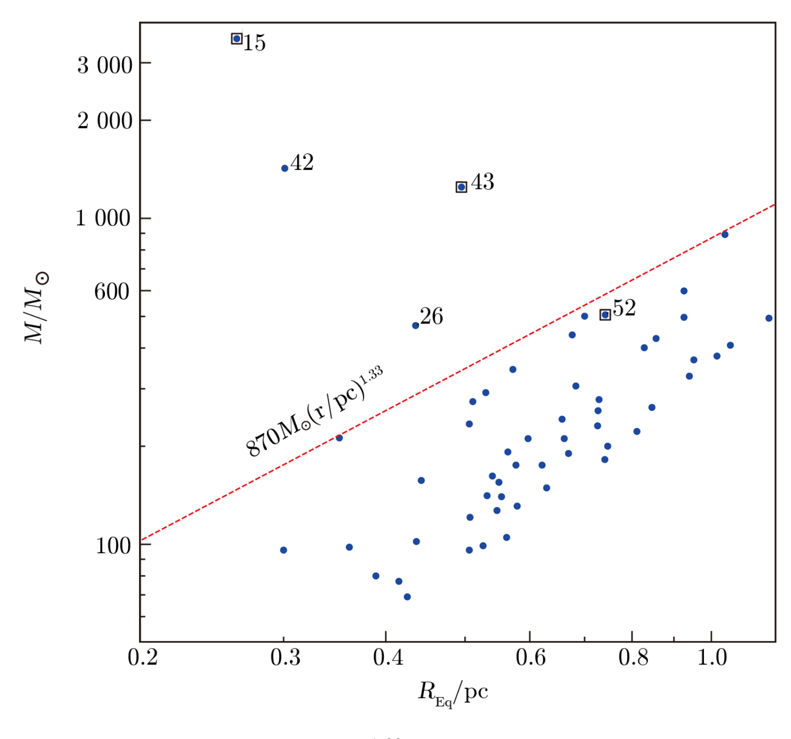


注：黑白背景为 8 μm 辐射，等值线为 21 cm 自由连续谱发射。等值线始于 1σ (1σ=6.8 K)，步长为 1σ。A, B, C, D 和 E 为五个致密电离氢区，用红色圆圈标记。红色星形、绿色五边形和蓝色三角分别代表 Class I, Class II 和 TDs 年轻星侯选体。

图 5　年轻星侯选体空间分布图

图 6 给出 N109 中 56 个团块的质量随着尺度的分布图，图中的虚线即为 Kauffmann 和 Pillai 提出的质量-尺度关系。图中有 4 个团块 (即 15, 26, 42, 43) 位于阈值 (虚线) 之上，预

示着它们很有可能形成大质量恒星；而位于阈值之下的其他4个团块可能倾向于形成小质量恒星，我们注意到其中团块 15, 43 与已知被探测到的 II 型甲醇脉泽 (如图 2，图 6) 在空间和速度上 ($3 \sim 7.5\,\mathrm{km \cdot s^{-1}}$) 均成协[65]。II 型甲醇脉泽通常被认为是有利于研究正在形成的大质量恒星活动的强力探针。相比而言，在团块 26, 42 处，目前还没有相应观测被开展。另外，位于阈值之下的团块 52 也被发现与 II 型甲醇脉泽成协[65]。因此，N109 壳层中能形成大质量恒星的团块可能至少有 5 个。这进一步说明了 N109 致密团块的分布与新一代大质量恒星形成活动在空间上具有好的相关性。



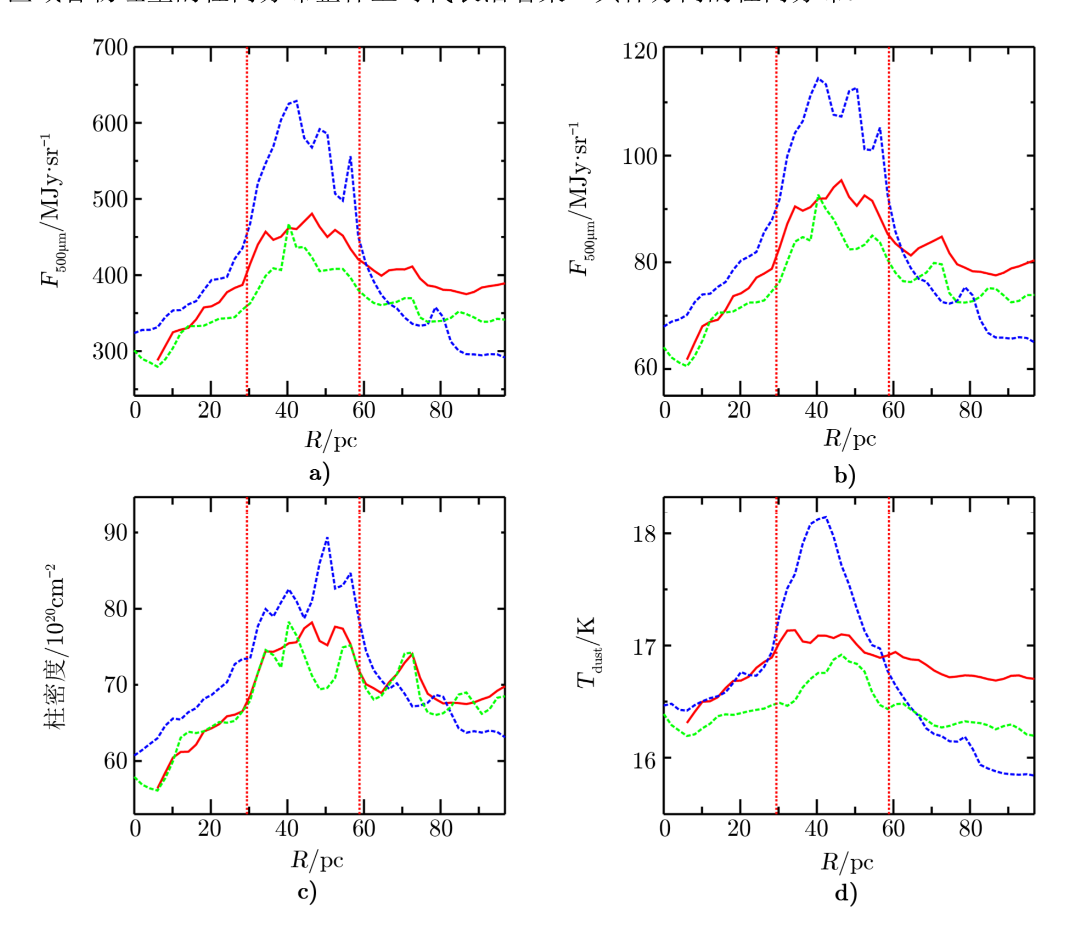
注：蓝点代表致密团块，红色虚线为 $870M_\odot(r/\mathrm{pc})^{1.33}$ 经验关系 (阈值)，位于该阈值以上的团块 (15, 26, 42, 43) 用序号标出，它们很可能形成大质量恒星。与 II 型甲醇脉泽成协的团块 (15, 43, 52) 用空心方块标出。

图 6　致密团块的质量-半径图

图 5 展示 218 个 YSO 侯选体的空间分布，图中背景为 8 μm 发射，等值线为 21 cm 连续谱；由图可看出，所证认出的 YSO 侯选体在所研究的整个红外尘泡区域呈现出几乎均匀的空间分布；另外，在红外尘泡壳层结构中存在 YSO 侯选体缺失现象；更甚至，尽管在 N109 的北部和西部致密团块的分布相对集中，但是 YSO 侯选体的空间分布在这两个地方并没有明显的聚集。一方面，这些结果可能是由于我们的年轻星样本的不完备性所致。在 N109 的壳层上中红外波段的背景辐射很亮 (如 8 μm，见图 5)，其中的年轻星 (若有的话) 也因此很难被证认出。另一方面，壳层中分子气体弥散的地方年轻星数目可能本来就少，而在气体稠密的北部和西部深度嵌埋的年轻星可能由于尘埃消光太严重以致于无法被探测到。

尽管通过我们所证认出的年轻星的空间分布无法代表壳层中可能正在发生的恒星形成

活动，但是新一代的袖珍电离氢区的存在说明 N109 的壳层为下一代恒星形成提供了场所。另外，由图 5 可见，在尘泡的西北部存在一个弓形的 21 cm 连续谱发射结构，意味着大质量恒星的电离辐射产生的电离波前，紧邻其相对较冷的近邻介质 (即 8 μm)；这说明电离气体正在通过电离波前与周围的介质发生相互作用，或挤压使其周围介质变得更致密，或破坏使其变得更弥散。为了更加定性地研究这些相互作用，我们在 Zhang 等人[66] 的工作基础上，给出了三个区域 (即图 2 中的区域 A, B 和 C) 的 250 μm, 500 μm 的流量密度、柱密度以及温度的径向分布 (见图 7)。径向距离从尘泡的中心出发，三个区域均可以被视为扇形，因此每个区域各物理量的径向分布整体上可代表沿着某一具体方向的径向分布。



注：a) 250 μm 流量密度；b) 500 μm 流量密度；c) 柱密度；d) 尘埃温度。图中的蓝色曲线代表参量在 A 区域中的径向分布，红色代表 B 区域，绿色代表 C 区域；竖直虚线标出了尘泡的内外半径，即约 29.4 pc 和约 58.8 pc。

图 7　4 个物理参量在 N109 三个区域的平均径向分布图

由图 7 可知，A 区域中 250 μm, 500 μm 的流量密度在内外半径均有陡变的趋势，这一陡变趋势在温度径向图中变得尤其明显，但在柱密度径向分布中却不明显，其主要原因归结于背景污染对温度的计算影响要远小于柱密度 (见 3.1 节)。 A 区域的流量密度和温度在内外

半径的陡变趋势意味着尘泡的壳层结构在内半径处受到了电离气体的电离波前挤压，在外半径处受到了超音速激波波前的挤压，从而使得物质在这里聚集；由于壳层位于电离波前的前面和激波波前的后面，它的温度因此会变得比未受到挤压的外部区域更高。相比 A 区域而言，区域 B 和 C 中的流量密度和温度在内外半径的变化就很平缓，这可能与区域内的星际介质正在被电离氢区的反馈破坏有关联。因此，在 N109 北部和西部正在或即将形成的大或小质量恒星活动正在受到电离氢区的影响，即主要通过电离波前挤压近邻介质使得物质再次聚集，从而触发形成新一代恒星。虽然这一过程与“聚集-坍缩”理论模型类似 (见第 1 章)，但还需对其进一步研究，进而限定 N109 周围的恒星形成过程。

5 总结

我们利用多波段数据对银河系中由电离氢区驱动的大红外尘泡 N109 (直径约为 83 pc) 进行了综合研究。多波段数据包括 Spitzer-GLIMPSE 和 MIPS-GAL 中红外、Herschel Hi-GAL 远红外、GRS ^{13}CO(J=1-0) 毫米波分子谱线以及 VGPS 21 cm 波连续谱巡天数据。我们主要研究了 N109 对周围介质及其中恒星形成活动的影响。我们发现，在 N109 的壳层结构中，有 56 个致密团块与之成协；其中 5 个很可能最终形成大质量恒星，其余将可能形成小质量恒星。其次，还有 5 个袖珍电离氢区也位于壳层结构上。最后，我们还发现膨胀的电离氢区 (电离波前) 正在与周围介质发生相互作用。在 N109 的正北和西部，电离波前很可能正在挤压其周围的介质使物质再聚集达到引力不稳定性并坍缩形成新一代的恒星；这实际上也与这两处成协的 5 个袖珍电离氢区的结果一致。这些结果共同表明红外尘泡 N109 正在通过电离氢区膨胀作用于周围介质，并通过挤压的方式再聚集物质，为新一代恒星形成提供了场所，这可能为触发恒星形成提供了一个必要的条件，因此我们认为 N109 是一个潜在的触发恒星形成场所。

致谢

致谢智利国家科委博士后独立基金 (Funding from Fondecyt Postdoctoral, ID 3190161)，并感谢上海天文台在论文写作期间提供的办公资源。

参考文献：

[1] Elmegreen B G, Lada C J. ApJ, 1977, 214: 725
[2] Bertoldi F. ApJ, 1989, 346: 735
[3] Lefloch B, Lazareff B. A&A, 1994, 289: 559
[4] Deharveng L, Zavagno A, Caplan J. A&A, 2005, 433: 565
[5] Deharveng L, Lefloch B, Massi F, et al. A&A, 2006, 458: 191
[6] Zavagno A, Pomares M, Deharveng L, et al. A&A, 2007, 472: 835
[7] Schuller F, Menten K M, Contreras Y, et al. A&A, 2009, 504: 415

[8] Deharveng L, Lefloch B, Kurtz S, et al. A&A, 2008, 482: 585
[9] Ogura K. Astronomical Society of India Conference Series. 2010, 1: 1
[10] Kendrew S, Simpson R, Bressert E, et al. ApJ, 2012, 755: 71
[11] Dale J E, Haworth T J, Bressert E. MNRAS, 2015, 450: 1199
[12] Samal M R, Zavagno A, Deharveng L, et al. A&A, 2014, 566: A122
[13] Liu H L, Wu Y, Li J Z, et al. ApJ, 2014, 798: 30
[14] Dale J E, Ercolano B, Bonnell I A. MNRAS, 2013, 431: 1062
[15] Deharveng L, Lefloch B, Zavagno A, et al. A&A, 2003, 408: L25
[16] Zavagno A, Deharveng L, Comerón F, et al. A&A, 2006, 446: 171
[17] Liu H L, Li J Z, Wu Y, et al. ApJ, 2016, 818: 95
[18] Reach W T, Faied D, Rho J, et al. ApJ, 2008, 690: 683
[19] Liu T, Wu Y, Zhang H, et al. ApJ, 2012, 751: 68
[20] Benjamin R A, Churchwell E, Babler B L, et al. PASP, 2003, 115: 953
[21] Carey S J, Noriega-Crespo A, Mizuno D R, et al. PASP, 2009, 121: 76
[22] Churchwell E, Povich M S, Allen D, et al. ApJ, 2006, 649(2): 759
[23] Simpson R J, Povich M S, Kendrew S, et al. MNRAS, 2012, 424(4): 2442
[24] Deharveng L, Schuller F, Anderson L D, et al. A&A, 2010, 523: A6
[25] Helfand D J, Becker R H, White R L, et al. ApJ, 2006, 131(5): 2525
[26] Thompson M A, Urquhart J S, Moore T J T, et al. MNRAS, 2012, 421: 408
[27] Zhang C P, Wang J J. A&A, 2012, 544: A11
[28] Yuan J H, Wu Y, Li J Z, et al. ApJ, 2014, 797: 40
[29] Zhang C P, Wang J J, Xu J L. A&A, 2013, 550: A117
[30] Zhang C P, Wang J J. RAA, 2013, 13: 47
[31] Zhou J, Zhou D, Esimbek J, et al. ApJ, 2020, 897: 74
[32] Bania T M, Anderson L D, Balser D S. ApJ, 2012, 759: 96
[33] Molinari S, Swinyard B, Bally J, et al. PASP, 2010, 122: 314
[34] Jackson J M, Rathborne J M, Shah R Y, et al. ApJS, 2006, 163: 145
[35] Stil J M, Taylor A R, Dickey J M, et al. ApJ, 2006, 132: 1158
[36] Poglitsch A, Waelkens C, Bauer O H, et al. A&A, 2010, 518: 4
[37] Griffin M J, Abergel A, Abreu A, et al. A&A, 2010, 518: L3
[38] Traficante A, Calzoletti L, Veneziani M, et al. MNRAS, 2011, 416: 2932
[39] Russeil D, Figueira M, Zavagno A, et al. A&A, 2019, 625: A134
[40] Molinari S, Schisano E, Elia D, et al. A&A, 2016, 591: A149
[41] Kauffmann J, Bertoldi F, Bourke T L, et al. A&A, 2008, 487: 993
[42] Sadavoy S I, Di Francesco J, Johnstone D, et al. ApJ, 2013, 767: 126
[43] Beckwith S V W, Sargent A I, Chini R S, et al. ApJ, 1990, 99: 924
[44] Anderson L D, Zavagno A, Deharveng L, et al. A&A, 2012, 542: A10
[45] Liu H L, Figueira M, Zavagno A, et al. A&A, 2017, 602: A95
[46] André P, Men'shchikov A, Könyves V, et al. IAUS, 2010, 6: 255
[47] Dyson J E, Williams D A. Physics of the Interstellar Medium, New York: Halsted Press, 1980: 204
[48] Mezger P G, Smith L F, Churchwell E. A&A, 1974, 32: 269
[49] Panagia N. AJ, 1973, 78: 929
[50] Black J H. MNRAS, 1981, 197: 553
[51] Meynet G, Maeder A. A&A, 2003, 404: 975
[52] Weidner C, Vink J S. A&A, 2010, 524: A98
[53] Tremblin P, Anderson L D, Didelon P, et al. A&A, 2014, 568: A4
[54] Lada C J. IAUS, 1987, 115: 1
[55] Greene T P, Wilking B A, Andre P, et al. ApJ, 1994, 434: 614
[56] Robitaille T P, Whitney B A, Indebetouw R, et al. ApJS, 2006, 167: 256

[57] Robitaille T P, Whitney B A, Indebetouw R, et al. ApJS, 2007, 169: 328
[58] Gutermuth R A, Myers P C, Megeath S T, et al. ApJ, 2008, 674: 336
[59] Gutermuth R A, Megeath S T, Myers P C, et al. ApJS, 2009, 184: 18
[60] Liu H L, Wu Y, Li J Z, et al. ApJ, 2015, 798: 30
[61] Koenig X P, Leisawitz D T. ApJ, 2014, 791: 131
[62] Flaherty K M, Pipher J L, Megeath S T, et al. ApJ, 2007, 663: 1069
[63] Kurtz S. IAUS, 2005, 1: 111
[64] Kauffmann J, Pillai T. ApJL, 2010, 723: L7
[65] Yang K, Chen X, Shen Z Q, et al. ApJS, 2019, 241: 18
[66] Zhang C P, Li G X, Wyrowski F, et al. A&A, 2016, 585: A117

Star Formation in the Infrared Bubble N109

SUN Jin-xu[1,2], LI Jin-zeng[1], LIU Hong-li[3,4],
DONG Xiao-yi[1], YUAN Jing-hua[1], ZHANG Guo-yin[1]

(1. China-Argentina Observation Base, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Department of Astronomy, Yunnan University, Kunming 650091, China; 4. Departamento de Astronomía, Universidad de Concepción, Av. Esteban Iturra s/n, Distrito Universitario, 160-C, Chile)

Abstract: Infrared (IR) bubbles associated with HII regions are ideal targets for studying triggered star formation. We present a multi-wavelength (from IR to centimetre wavelengths), comprehensive analysis on the impact of the IR bubble N109, one of the largest bubbles in our Galaxy, on its surroundings and star formation therein. Fifty-six dense clumps are found associated with the bubble and mainly located in the north and west. They all most likely form new stars eventually, five of which most likely form high-mass stars and others of which form low-mass stars. In these two regions there are also five associated compact HII regions, indicative of a new generation of high-mass star formation. In addition, a signature of the compression acting on the surroundings by the expansion of the bubble/HII region is observed in the north and west of N109. These results collectively indicate that N109 is impacting its surroundings due to the expansion of the associated driving HII region. This expansion compresses the surroundings, collecting material to provide physical environments for next generation of star formation, which provides a necessary condition for triggered star formation. We therefore suggest that N109 would be a potential site of triggered star formation.

Key words: massive star formation; interstellar medium; molecular clouds; HII region; dust bubbles